Iranian Journal of Field Crops Research
Homepage: https://jcesc.um.ac.ir

Research Article
Vol. 22, No. 4, Winter 2025, p. 401-418

Investigation the Response of Wheat (*Triticum aestivum* L.) Grain Yield to Foliar Application of *Azospirillum*, Zn and 6-Banzylaminopurine

M. J. Zarea[1*]

1- Associate Professor, Department of Agronomy and Crop Breeding, Faculty of Agriculture, Ilam University, Ilam, Iran
(*- Corresponding Author Email: mj.zarea@ilam.ac.ir)

Received: 21 February 2024 Revised: 22 May 2024 Accepted: 27 May 2024 Available Online: 07 December 2024	**How to cite this article:** Zarea, M. J. (2025). Investigation the Response of Wheat (*Triticum aestivum* L.) Grain Yield to Foliar Application of *Azospirillum*, Zn and 6-Banzylaminopurine. *Iranian Journal of Field Crops Research, 22*(4), 401-418. (in Persian with English abstract). https://doi.org/10.22067/jcesc.2024.86853.1309

Introduction

Many millions of hectares of wheat-cultivated lands are located in semi-arid areas, and cereal crops such as wheat grown under such conditions frequently face drought events during their life cycle. A considerable amount of rainfall in the semi-arid areas of Iran occurs in winter; thus, the critical growth period (grain filling) receives little to no rainfall. Studies have shown that micronutrients, plant growth regulators, and plant growth-promoting bacteria are able to improve plant performance under drought conditions. The present study aimed to elucidate the effect of foliar application of Zn, exogenous application of 6-benzylaminopurine, and foliar inoculation with *Azospirillum* on wheat performance under rain-fed conditions.

Materials and Methods

The present study consisted of two field experiments, carried out in a semi-arid area. Experiment 1 was conducted during the 2020/21 and the second one during 2022-203 wheat growing season. The effect of four different levels of Zn application (0, 2, 3, and 4 kg Zn ha^{-1}) via foliar application was investigated on wheat yield, yield components, and seed Zn content under exogenous application of two levels of 6-benzylaminopurine (0 and 10 mg L^{-1}) under rain-fed conditions. The experimental design was a 4×2 factorial combination of Zn application and 6-benzylaminopurine exogenous application arranged in a randomized complete block design with three replications. The experimental plot size was 1 m × 2 m, and the wheat cultivar *Sardari* was used in the experiments. Foliar application was applied at the flowering stage (Zadok's growth stage 65). Based on the results obtained from the first experiment, a subsequent field study (second experiment) was performed to elucidate the efficacy of the foliar application of Zn (3 kg Zn ha^{-1}) and 6-benzylaminopurine (10 mg L^{-1}) in the presence and absence of foliar inoculation with *Azospirillum*. The second experiment was conducted in the 2022-2023 wheat growing season. Wheat response to foliar application of 0.3% (w v^{-1}) $ZnSO_4$, 10 mg L^{-1} 6-benzylaminopurine, and foliar inoculation with *Azospirillum brasilense* Sp7 was investigated under rain-fed conditions. The plant canopy was inoculated with 10% of 108 colony-forming units of *Azospirillum* strain Sp7. All foliar applications were applied at anthesis (Zadok's growth stage 65). The experimental design for this experiment was a factorial scheme based on a randomized complete block design with three replications. The wheat variety used for the experiments was Sardari.

https://doi.org/10.22067/jcesc.2024.86853.1309

Results and Discussion

The application of zinc (Zn) significantly affected the seed number, whereas the application of 6-BAP and its interaction with Zn did not have a significant impact. The highest seed number per head was observed with Zn application at 3 kg ha^{-1}, followed by 2 kg ha^{-1}. The highest Zn application had a negative effect on seed number per head. The effect of foliar application level and 6-BAP and their interaction on grain weight and grain yield was significant. Application of 3% (w v^{-1}) (3 kg Zn ha^{-1}) yielded the highest grain weight and grain yield, and higher application of Zn had a negative effect on grain weight and yield. Foliar-applied 6-benzylaminopurine (10 mg L^{-1}) significantly improved grain weight and grain yield. Improved grain weight and grain number per spike affected total grain yield. The highest grain yield was achieved with 3 kg Zn ha^{-1} (0.3% (w v^{-1}) Zn plus 10 mg L^{-1} 6-BAP). Applied Zn significantly increased Zn content in grains. The highest grain Zn content was obtained in plants that were sprayed with 4 kg Zn ha^{-1} and 10 mg L^{-1} 6-BAP. Results of the second experiment revealed the efficacy of *Azospirillum* in the improvement of grain weight and grain yield. In the second year of the study, the effect of exogenous application of 6-BAP on yield and yield components was not significant, which might be attributed to the precipitation rate. However, foliar inoculation with *Azospirillum* and foliar application of Zn significantly affected grain yield. The highest grain yield was obtained from plants foliar-applied with Zn plus *Azospirillum*.

Conclusion

Micronutrients, plant growth regulators, and biofertilizers have the ability to improve plant performance, especially under environmental constraints. The present study, carried out under rain-fed conditions, investigated the effect of *Azospirillum brasilense*, Zn nutrition, and 6-benzylaminopurine applied foliarly on the wheat cultivar *Sardari*. Overall, the application of Zn at a rate of 3 kg per ha combined with foliar inoculation with *Azospirillum* produced the best results for wheat performance. Additionally, Zn also improved Zn content in the grain. As a result, farmers can improve the productivity of winter wheat yield by utilizing a small amount of zinc fertilizer (3% (w v^{-1}) (3 kg Zn ha^{-1}) and the plant-growth promoting bacteria *Azospirillum* at the flowering stage.

Keywords: Foliar application, Grain yield and component, Grain Zn content, Rain-fed condition

نشریه پژوهشهای زراعی ایران
Homepage: https://jcesc.um.ac.ir

مقاله پژوهشی

جلد ۲۲، شماره ٤، زمستان ۱٤۰۳، ص ٤۰۱-٤۱۸

بررسی پاسخ عملکرد دانه گندم (*Triticum aestivum* L.) به محلول‌پاشی با باکتری *آزوسپیریلوم*، هورمون بنزیل آمینو پورین و روی

محمدجواد زارع[1*]

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱۲/۰۲
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۳/۰۷

چکیده

بخش قابل‌توجهی از گندم تحت شرایط دیم تولید می‌شود. بنابراین، حفظ عملکرد و افزایش کیفی دانه گندم تحت کشت دیم ضروری است. دو آزمایش مزرعه‌ای جهت ارزیابی تأثیر محلول‌پاشی با روی، هورمون بنزیل آمینو پورین و محلول‌پاشی با باکتری *آزوسپیریلوم* بر گندم رقم سرداری تحت کشت دیم انجام گرفت. در آزمایش اول که به‌صورت آزمایش فاکتوریل در قالب طرح بلوک کامل تصادفی اجرا گردید، تأثیر چهار سطح روی (۰، ۰/۲، ۰/۳ و ۰/۴ درصد) و دو سطح هورمون (۰ و ۱۰ میلی‌گرم در لیتر) بر عملکرد و محتوای روی دانه بررسی گردید. محلول‌پاشی پس از مرحله گرده‌افشانی انجام گرفت. براساس بهترین ترکیب تیماری حاصل از آزمایش اول، تأثیر کاربرد ۰/۳ درصد روی به‌تنهایی و یا در انواع ترکیب‌های مختلف با *آزوسپیریلوم برازیلنس* و بنزیل آمینو پورین در سال زراعی ۱۴۰۲-۱۴۰۱ در آزمایشی فاکتوریل بر پایه طرح بلوک کامل تصادفی و در سه تکرار مورد ارزیابی قرار گرفت. تأثیر هورمون بر افزایش عملکرد فقط در سال اول انجام آزمایش معنی‌دار بود. میزان عملکرد دانه تحت کاربرد غلظت‌های ۰، ۰/۲، ۰/۳ و ۰/۴ درصد روی به‌ترتیب ۲۶۷۳، ۲۹۳۰، ۲۹۹۷ و ۳۰۸۶ کیلوگرم دانه در هکتار بود. محلول‌پاشی با روی، محتوای روی دانه را از ۲۳/۳ (شاهد) به ۲۷/۹ میلی‌گرم در کیلوگرم افزایش داد. در بررسی نتایج تلفیق هورمون با روی و باکتری، بیشترین میزان عملکرد دانه از تلفیق باکتری با روی حاصل گردید. بنابراین، کاربرد باکتری و روی از طریق محلول‌پاشی جهت افزایش عملکرد و محتوای روی گندم می‌تواند مورد توجه قرار گیرد.

واژه‌های کلیدی: دیم‌کاری، عملکرد و اجزای عملکرد دانه، محتوای روی دانه، محلول‌پاشی برگی

مقدمه

گندم (*Triticum aestivum* L.) یکی از محصولات استراتژیک کشور است. کشت این گیاه تحت هر دو شرایط آبی و دیم در کشور رواج دارد. توجه به حفظ و افزایش کیفیت دانه گندم به‌دلیل جایگاه مهمی که این گیاه در تغذیه جوامع انسانی دارد از اهمیت بسیار بالایی برخوردار است. با وجود تلاش‌های انجام‌گرفته در چند دهه اخیر جهت افزایش محتوای روی دانه گندم، هنوز هم مشکل فقر روی دانه کاملاً برطرف نگردیده است (Cakmak & Kutman, 2018; Ning *et al.*, 2021). روش‌های مختلفی جهت افزایش میزان روی دانه طی چند دهه اخیر معرفی شده است. در این ارتباط، یکی از روش‌های ساده و کم‌هزینه، محلول‌پاشی روی است. محلول‌پاشی با روی نه‌تنها بر افزایش عملکرد دانه مؤثر است، بلکه محتوای روی دانه را نیز افزایش می‌دهد (Karim *et al.*, 2012; Sattar *et al.*, 2022; Zarea & Karimi, 2023a). بررسی تأثیر هورمون‌های رشد گیاهی بر افزایش عملکرد گندم نیز مبحث مطالعاتی بسیاری از تحقیقات اخیر بوده است (Wu *et al.*, 2024). تنظیم‌کننده‌های رشد گیاهی و هورمون‌های سنتزی در افزایش تحمل گیاه به تنش‌های محیطی و نیز افزایش رشد و عملکرد آن‌ها مؤثر هستند. در دهه‌های اخیر، استفاده از باکتری‌های محرک رشد گیاه جهت افزایش رشد و عملکرد گندم نیز مورد توجه قرار گرفته است. بنابراین، بررسی تأثیر محلول‌پاشی با روی به همراه هورمون رشد گیاهی و باکتری القاکننده رشد می‌تواند اطلاعات بیشتری در خصوص امکان استفاده از آن‌ها جهت افزایش عملکرد و میزان روی دانه گندم در اختیار قرار دهد.

بخش قابل‌توجهی از جوامع انسانی کشورهای در حال توسعه و

۱- دانشیار، گروه زراعت و اصلاح نباتات، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ایلام، ایلام، ایران
(*- نویسنده مسئول: Email: mj.zarea@ilam.ac.ir)
https://doi.org/10.22067/jcesc.2024.86853.1309

به‌خصوص آن بخشی که غلات رژیم اصلی غذایی آن‌ها را تشکیل می‌دهد، در معرض کمبود عناصر غذایی به‌خصوص روی قرار دارند (Desta *et al.*, 2023). کمبود روی و عدم دریافت کافی آن در رژیم غذایی روزانه منجر به ایجاد بیماری‌های مختلفی در بزرگسالان و کودکان می‌گردد. سالانه تعداد قابل‌توجهی از کودکان زیر پنج سال جهان جان خود را به‌علت کمبود روی در رژیم غذایی از دست می‌دهند (Xia *et al.*, 2018). بنابراین، افزایش محتوای عناصر غذایی محصولات کشاورزی از اهمیت بالایی برخوردار است. در چند دهه اخیر، روش‌های ساده‌ای جهت افزایش میزان روی دانه گندم معرفی و مورد استفاده قرار گرفته است (Cakmak, 2008). پرایم بذر با روی، کاربرد روی به‌صورت مخلوط آن با خاک و یا کاربرد آن از طریق محلول‌پاشی برگی، از متداول‌ترین روش‌هایی است که مورد بررسی قرار گرفته‌اند. کاربرد روی از طریق محلول‌پاشی برگی جهت افزایش محتوای روی دانه مؤثرتر از روش‌های دیگر گزارش شده است (Cakmak & Kutman, 2018; Zou *et al.*, 2012). محلول‌پاشی با روی، محتوای روی دانه را به‌صورت معنی‌داری در دانه گندم (Zarea & Karimi, 2023a) و برنج (*Oryza sativa* L.) (Saha *et al.*, 2020) افزایش داده است. البته مقدار افزایش میزان روی دانه از طریق محلول‌پاشی روی می‌تواند تحت تأثیر محیط و ژنوتیپ قرار گیرد (Ning *et al.*, 2022).

روی، دارای نقش‌های مختلفی در گیاه است. این عنصر به‌عنوان کوفاکتور در بیش از ۳۰۰ آنزیم نقش دارد (Broadley, White, Hammond, Zelko, & Lux, 2007; Coleman, 1998). روی میزان جوانه‌زنی دانه، پایداری غشاء سلولی، تجمع اسمولیت‌های سازگار، تنظیمات روزنه‌ای و کارآیی مصرف آب و فتوسنتز را تحت تنش خشکی بهبود می‌بخشد (Umair Hassan *et al.*, 2020). گزارش‌هایی در خصوص افزایش عملکرد دانه گندم در اثر محلول‌پاشی با روی منتشر شده است (Karim *et al.*, 2012; Sattar *et al.*, 2022; Zarea & Karimi, 2023a). بنابراین، استفاده از روی نه‌تنها موجب افزایش محتوای روی دانه می‌گردد، بلکه ممکن است بر افزایش عملکرد دانه نیز مؤثر باشد.

امروزه استفاده از هورمون‌های گیاهی و تنظیم‌کننده‌های رشد گیاه جهت افزایش رشد، نمو و عملکرد گیاهان به‌خصوص در بوم‌نظام‌های زراعی تحت تنش مورد توجه بیشتری قرار گرفته است. بنزیل آمینو پورین (Benzylaminopurine) نوعی تنظیم‌کننده رشد سنتزی است که تأثیر آن در گیاه گندم مورد مطالعه قرار گرفته است. این هورمون میزان تقسیمات سلولی مانند تقسیمات سلول‌های آندوسپرم دانه و انتقال مواد پرورده فتوسنتزی به سمت دانه را افزایش داده و تحمل گیاه به تنش‌های محیطی را بیشتر می‌کند (Zhang *et al.*, 2022). بنزیل آمینو پورین، پیری برگ را به تأخیر انداخته (Moore & Leach, 1968) و میزان کلروفیل برگ را افزایش می‌دهد (Ren, Zhang, Dong, Liu, & Zhao, 2017). محلول‌پاشی با این هورمون در مرحله گرده‌افشانی موجب تأخیر در پیری برگ پرچم گندم شده است (Li, Wei, Li, & Wang, 2019a). گزارش شده است که محلول‌پاشی با بنزیل آمینو پورین، میزان انتقال قندهای محلول و ساکارز را از برگ و ساقه به سمت سنبله افزایش داده است (Li *et al.*, 2019b). تأثیر کاربرد خارجی (محلول‌پاشی) بنزیل آمینو پورین بر سطح هورمون‌های داخلی گندم مورد بررسی و تأیید قرار گرفته است (Yang *et al.*, 2018). محلول‌پاشی این هورمون بر محتوای پروتئین دانه گندم تأثیرگذار بوده و آن را افزایش داده است (Yang *et al.*, 2018). این هورمون در افزایش میزان فتوسنتز و ظرفیت سیستم آنتی‌اکسیدانتی نقش دارد (Yang *et al.*, 2018). گزارش شده است که کاربرد هورمون ۶-بنزیل آمینو پورین موجب افزایش میزان انتقال ذخایر فتوسنتزی برگ و ساقه (ذخایر قبل از گل‌دهی) به سمت دانه می‌گردد (Yang *et al.*, 2018). البته تأثیر این هورمون در گیاهان مختلف یکسان نیست. به‌عنوان نمونه، محلول‌پاشی با این هورمون تأثیری بر عملکرد دانه سویا (*Glycine max*) نداشته است، هرچند که هدایت روزنه‌ای و میزان فتوسنتز برگ را افزایش داده است (Lian *et al.*, 2023).

استفاده از باکتری‌های محرک رشد گیاه جهت افزایش محصول گیاهان زراعی مورد توجه بسیاری از محققان در سرتاسر جهان بوده است. این باکتری‌ها از طریق مستقیم و غیرمستقیم، میزان رشد گیاه را افزایش می‌دهند. این باکتری‌ها، میزان فتوسنتز برگ و جذب عناصر خاک به گیاه را به‌خصوص تحت رخداد تنش‌های محیطی افزایش می‌دهند (Kashif *et al.*, 2023). گزارش‌های متعددی در خصوص تأثیر این باکتری‌ها بر افزایش عملکرد گندم به‌خصوص تحت وجود تنش خشکی منتشر شده است (Zarea, 2017). این گروه از باکتری‌ها دارای جایگاه مهمی در اکوسیستم خاک هستند (Yuan, Li, Shan, Tong, & Zhao, 2023) و به‌دلیل ارتباط نزدیکی که با ریشه گیاهان برقرار می‌کنند، امکان بهره‌برداری از آن‌ها را جهت افزایش تولیدات زراعی امکان‌پذیر ساخته است (Zhang, Zhao, Yin, & Zhu, 2021). باکتری جنس *آزوسپیریلوم* (*Azospirillum*) جزو مهم‌ترین گروه‌های باکتری‌های القاکننده رشد گیاهان هستند. *آزوسپیریلوم*، آزادزیست و تثبیت‌کننده نیتروژن اتمسفری است. سودمندی این باکتری‌ها بر گیاهان تحت هر دو شرایط تنش و عدم تنش‌های محیطی مورد بررسی و تأیید قرار گرفته است (Omer, Osman & Badawy, 2022). *آزوسپیریلوم* از طریق مستقیم و غیرمستقیم تحمل گیاه به تنش خشکی را افزایش می‌دهد (Omer *et al.*, 2022). تلقیح با بذر و یا مخلوط کردن با خاک از روش‌های متداول کاربرد این باکتری‌ها است. البته در سالیان اخیر، پژوهش‌هایی در خصوص کاربرد این باکتری‌ها به‌صورت محلول‌پاشی انجام گرفته

است (Cardozo *et al*., 2022).

پژوهش حاضر از دو آزمایش مزرعه‌ای تشکیل شده بود. هدف اصلی آزمایش اول، بررسی تأثیر محلول‌پاشی با مقادیر مختلف روی (۰، ۲، ۳ و چهار کیلوگرم در هکتار) در مرحله گرده‌افشانی بر افزایش محتوای روی و عملکرد دانه گندم بود. با توجه به نقش مثبت ۶- بنزیل آمینو پورین در افزایش رشد گیاهان، کاربرد مقادیر مختلف روی در تلفیق با این هورمون در سال اول آزمایش مورد بررسی قرار گرفت. در آزمایش سال دوم که براساس نتایج سال اول طراحی گردید، تأثیر روی (سه کیلوگرم در هکتار) به همراه هورمون بنزیل آمینو پورین (۱۰ میلی‌گرم در لیتر) در تلفیق با باکتری *آزوسپیریلوم برازیلنس* (*Azospirillum brasilense*) مورد مطالعه قرار گرفت. گزارش شده است که سیتوکنین می‌تواند میزان قدرت مخزن (دانه) را از طریق افزایش تقسیمات سلول‌های آندوسپرم افزایش دهد. بنابراین، فرضیه استفاده از بنزیل آمینو پورین در این مطالعه به‌علت نقش این تنظیم‌کننده رشد در افزایش قدرت مخزن (دانه) بود. همچنین با توجه به گزارش‌های منتشرشده در خصوص تأثیر مثبت محلول‌پاشی با باکتری‌های القاکننده رشد در گیاهان زراعی، از باکتری *آزوسپیریلوم برازیلنس* سویه Sp7 در تلفیق با روی و هورمون در مطالعه حاضر استفاده گردید.

مواد و روش‌ها

پژوهش حاضر از دو مطالعه مزرعه‌ای تشکیل شده بود. در مطالعه سال اول، چهار سطح میزان روی به‌صورت محلول‌پاشی در ترکیب با دو سطح هورمون بنزیل آمینو پورین بر عملکرد و محتوای روی دانه گندم مورد بررسی قرار گرفت. در سال دوم، کاربرد سه کیلوگرم روی، ۱۰ میلی‌گرم بر لیتر هورمون بنزیل آمینو پورین و تلقیح برگی با *آزوسپیریلوم برازیلنس* بر میزان عملکرد دانه ارزیابی گردید. هر دو آزمایش تحت شرایط دیم انجام گرفت. از گندم رقم سرداری در هر دو مطالعه استفاده گردید. میزان متوسط دمای کمینه و بیشینه و همچنین میانگین بارش ماهانه در هر دو سال آزمایش در جداول ۱ و ۲ نشان داده شده است.

در سال زراعی ۱۴۰۱-۱۴۰۰ تأثیر محلول‌پاشی با روی در چهار سطح مختلف ۰، ۰/۲، ۰/۳ و ۰/۴ درصد (نسبت وزنی/حجمی) از منبع سولفات روی در تلفیق با دو سطح هورمون ۶- بنزیل آمینو پورین (۰ و ۱۰ میلی‌گرم در لیتر) بر عملکرد، اجزای عملکرد و محتوای روی دانه ارزیابی شد. رقم گندم انتخاب‌شده، رقم سرداری و کشت آن تحت شرایط دیم انجام گرفت. آزمایش در قطعه زمینی متعلق به یکی از گندم‌کاران منطقه دهگلان استان کردستان انجام گرفت. شرایط آب‌وهوایی منطقه در سال انجام آزمایش در جدول ۱ و ۲ نشان داده شده است. آزمایش به‌صورت فاکتوریل و در قالب طرح بلوک کامل تصادفی با سه تکرار انجام گرفت. ابعاد هر کرت آزمایشی، دو متر در یک متر در نظر گرفته شد. فاصله بین واحدهای آزمایشی، یک متر و فاصله بین بلوک‌ها، ۰/۵ متر بود. تمام عملیات کاشت، داشت و اعمال کودهای پایه مطابق روش مرسوم کشاورزان منطقه انجام گرفت.

برای تهیه محلول روی از سولفات روی ($ZnSO_4.7H_2O$، شرکت مرک) استفاده گردید. محلول‌های روی با میزان‌های دو، سه و چهار گرم در لیتر آب مقطر تهیه گردید. برای تهیه محلول ۶- بنزیل آمینو پورین، ابتدا محلول پایه هورمون تهیه گردید. به این منظور، هورمون در اتانول (۰/۱ گرم در یک میلی‌لیتر) حل گردید و سپس غلظت مورد نظر (۱۰ میلی‌گرم در لیتر) با رقیق کردن محلول پایه در آب مقطر تهیه گردید. در تمام محلول‌ها تهیه‌شده از توئین-۲۰ با غلظت ۰/۰۲ درصد (نسبت حجمی/حجمی) به‌عنوان مویان استفاده گردید. از آب مقطر حاوی اتانول و توئین-۲۰ با غلظت ۰/۰۲ درصد (نسبت حجمی به حجمی) نیز به‌عنوان شاهد استفاده شد. انجام محلول‌پاشی در عصر و هنگامی که وزش باد متوقف گردید، به شکل محلول‌پاشی دستی انجام گرفت. محلول‌پاشی پس از گرده‌افشانی انجام گرفت. حجم محلول‌پاشی به‌میزان هزار لیتر در هکتار (۱۰۰ میلی‌لیتر در مترمربع) بود. حجم محلول به‌گونه‌ای انتخاب شد که کل برگ‌ها و سنبله را مرطوب کند. نمونه‌برداری جهت تعیین عملکرد، محدود به یک مترمربع مرکز کرت‌های آزمایشی بود و از برداشت ردیف‌های حاشیه خودداری گردید. وزن سنبله از میانگین‌گیری ۱۵ سنبله که تصادفی انتخاب شده بود، تعیین شد. از پنج سنبله جهت تعیین اجزای عملکرد دانه (تعداد دانه در سنبله و وزن دانه) استفاده گردید. جهت اندازه‌گیری میزان عنصر روی، ابتدا مقدار یکسانی از بذرها در دمای ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد در کوره الکتریکی خاکستر شدند و سپس هضم آن‌ها در مخلوطی اسیدی (اسید نیتریک و اسید کلریدریک) انجام گرفت. جذب اتمی نمونه‌ها به‌روش اسپکتروفتومتری در طول موج ۵۴۶ نانومتر قرائت گردید (Jones, 2001).

در سال دوم آزمایش (سال زراعی ۱۴۰۲-۱۴۰۱) اثر سه تیمار روی، ۶- بنزیل آمینو پورین و باکتری *آزوسپیریلوم برازیلنس* سویه Sp7 بر عملکرد دانه و اجزای عملکرد دانه مورد بررسی قرار گرفت. محلول‌پاشی با روی در دو سطح (۰ و ۰/۳ درصد (نسبت وزنی به حجمی))، هورمون ۶- بنزیل آمینو پورین با دو غلظت ۰ و ۱۰ میلی‌گرم در لیتر و تلقیح با باکتری *آزوسپیریلوم برازیلنس* سویه Sp7 (کاربرد و عدم کاربرد آن) پس از مرحله گرده‌افشانی انجام گرفت. تهیه محلول‌های روی و هورمون مطابق روش سال اول آزمایش بود. باکتری استفاده‌شده در این آزمایش *آزوسپیریلوم برازیلنس* سویه Sp7 بود که توسط پروفسور فیلیپ فرانکن در اختیار قرار داده شد. از کشت تازه باکتری برای تهیه مایه تلقیح استفاده گردید. جهت تهیه مایه تلقیح، از باکتری که قبلاً روی پلیت به‌مدت چهار روز کشت داده شده بود استفاده شد. ابتدا پنج عدد کلونی از باکتری به شیشه ارلن مایر

یک لیتری حاوی ۵۰۰ میلی‌لیتر محیط غذای بـدون نیتـروژن (NFb) تحت شرایط استریل انتقـال داده شـد. سـپس ارلن‌هـای کشـت روی شیکر با تعداد ۱۲۰ دور در دقیقـه در دمـای ۲۸ درجـه سـانتی‌گراد در طول شب شیک شدند. تعداد باکتری در هر میلی‌لیتر محلول کشت با استفاده از بافر فسفات به $۱۰^۷ \times ۱$ سلول باکتری (واحد تشکیل کلنی) در میلی‌لیتر رقیق گردید. جهت محلول‌پاشی از غلظت ۱۰ درصد مایـه تلقیح رقیق‌شده ($۱۰^۷ \times ۱$ واحد تشکیل کلنی) استفاده شد. به عبـارتی دیگر، ۱۰ میلی‌لیتر از محیط کشـت بـاکتری حـاوی $۱۰^۷ \times ۱$ سـلول باکتری در ۹۰ میلی‌لیتر آب مقطر حـل گردیـد تـا غلظـت ۱۰ درصـد باکتری حاصل گردد. میزان محلول‌پاشی در سال دوم آزمـایش ماننـد سال اول آزمـایش (۱۰۰۰ لیتـر در هکتـار) بـود. انجـام محلول‌پاشـی به‌علت وزش باد در هنگام عصر پس از غروب آفتاب انجام گرفت.

تجزیه آماری داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار SAS نسـخه ۹ انجـام گرفت. در صورت معنی‌دار بودن اثـرات سـاده و یـا متقابـل، مقایسـه میانگین تیمارها با استفاده از آزمون حداقل اختلاف معنی‌دار در سـطح احتمال پنج درصد انجام گرفت.

جدول ۱- میانگین بارش ماهیانه و متوسط درجه حرارت‌های کمینه و بیشینه در طول فصل رشد گندم در سال زراعی ۱٤۰۱-۱٤۰۰

Table 1- Average monthly rainfall and average monthly maximum and minimum temperatures during wheat growing season in 2021-22

ماه Month	دما Temperature (°C)		بارندگی Rainfall (mm)
	کمینه Minimum	بیشینه Maximum	
November آبان	-0.8	12.2	50.2
December آذر	-2.9	10.8	27.4
January دی	-6.5	6.2	33.6
February بهمن	-11	4	26.6
March اسفند	-2.1	10.1	72
April فروردین	0.5	17.6	13.4
May اردیبهشت	3.3	19.3	40
June خرداد	7.3	28.9	0.4
July تیر	9.9	33.5	0

جدول ۲- میانگین بارش ماهیانه و متوسط درجه حرارت‌های کمینه و بیشینه در طول فصل رشد گندم در سال زراعی ۱٤۰۲-۱٤۰۱

Table 2- Average monthly rainfall and average monthly maximum and minimum temperatures during wheat growing season in 2022-23

ماه Month	دما Temperature (°C)		بارندگی Rainfall (mm)
	کمینه Minimum	بیشینه Maximum	
November آبان	-0.8	15.4	18.2
December آذر	-2.3	7.3	34.8
January دی	-8.5	0.8	51.8
February بهمن	-13.2	1.4	33.8
March اسفند	-1.5	11.9	92
April فروردین	1.2	14.9	70.6
May اردیبهشت	3.1	19.9	87.2
June خرداد	7.3	26.4	19
July تیر	26.5	45.8	0

نتایج و بحث

دو پژوهش مزرعه‌ای تحت شرایط دیم جهت بررسی تأثیرگـذاری محلول‌پاشی با روی انجام گرفت. در سـال اول، مطالعـه تـأثیر چهـار سطح مختلف روی و دو غلظت هورمون بنزیل آمینـو پـورین پـس از گرده‌افشانی بر عملکرد و روی دانه گندم رقم سرداری تحت شـرایط

دیم بررسی گردید. در سال دوم، کاربرد سه کیلوگرم روی به‌صورت محلول‌پاشی در تلفیق با هورمون و باکتری *آزوسپیریلوم* بر عملکرد دانه ارزیابی گردید.

آزمایش اول

نتایج تجزیه واریانس تأثیر محلول‌پاشی با چهار غلظت مختلف روی (۰، ۰/۲، ۰/۳ و ۰/۴ درصد) و دو سطح هورمون بنزیل آمینو پورین (۰ و ۱۰ میلی‌گرم در لیتر) بر عملکرد و اجزای عملکرد دانه گندم رقم سرداری در جدول ۳ نشان داده شده است.

اثر روی و هورمون بر میزان متوسط وزن تک‌سنبله معنی‌دار بود (جدول ۳). اثر متقابل این دو تیمار بر وزن تک‌سنبله معنی‌دار نگردید. سنبله در گیاهان محلول‌پاشی‌شده با هورمون، ۱/۴۴ و در گیاهان شاهد، ۱/۳۹ گرم بود. محلول‌پاشی با روی، وزن سنبله را به‌صورت معنی‌داری افزایش داد. هرچند که غلظت‌های مختلف استفاده‌شده، تأثیر متفاوتی بر وزن سنبله داشتند. بیشترین میزان وزن سنبله (۱/۴۵ گرم) از کاربرد سه کیلوگرم روی در هکتار (۰/۳ درصد سولفات روی) حاصل گردید و کاربرد مقدار بالاتر آن (چهار کیلوگرم در هکتار) تأثیری بر افزایش بیشتر وزن سنبله نداشت (شکل ۱). محلول‌پاشی با غلظت ۰/۴ درصد (چهار کیلوگرم در هکتار) وزن سنبله را کاهش داد (شکل ۱) که نشان‌دهنده تأثیر منفی سطوح بالای روی بر این صفت در گندم بود. کاهش میزان وزن سنبله در اثر محلول‌پاشی با بالاترین غلظت روی را می‌توان به تأثیرات سمی غلظت‌های بالای این عنصر در گیاه مرتبط دانست (Andrejic, Gajic, Prica, Dželetović, & Rakić, 2018). تأثیرات منفی سطوح بالای روی بر میزان فتوسنتز، هدایت روزنه‌ای، تعرق و میزان غلظت دی‌اکسیدکربن فضای بین سلولی داخل برگ قبلاً گزارش شده است (Andrejic *et al.*, 2018). وزن سنبله، شاخصی از میزان وزن دانه، تعداد دانه و کاه سنبله است. در این مطالعه، میزان وزن کاه سنبله اندازه‌گیری شد. اثر محلول‌پاشی با روی بر وزن کاه سنبله معنی‌دار، اما اثر متقابل آن با هورمون بنزیل آمینو پورین و نیز کاربرد به‌تنهایی هورمون، تأثیری معنی‌دار بر آن نداشتند (جدول ۳). بنابراین، افزایش میزان وزن سنبله در اثر کاربرد هورمون به‌علت افزایش وزن دانه بوده و هورمون تأثیری بر وزن کاه سنبله نداشته است. هورمون بنزیل آمینو پورین نوعی سیتوکنین سنتزی است که موجب افزایش تقسیمات سلولی می‌شود و از تجزیه کلروفیل و زوال برگ جلوگیری می‌کند (Vylicilova *et al.*, 2020). گزارش شده است که بنزیل آمینو پورین، تجمع نشاسته در دانه گندم را افزایش داده است (Zhang *et al.*, 2022). بیان شده است که این هورمون از طریق افزایش طول دوره پر شدن دانه باعث افزایش وزن هزار دانه گندم شده است (Zhang *et al.*, 2022). با توجه به نقش بنزیل آمینو پورین در القای تقسیمات سلولی (سلول‌های آندوسپرم دانه) (Mangena, 2022)، به نظر می‌رسد که علت افزایش وزن دانه به‌دلیل بیشتر شدن قدرت مخزن (افزایش تقسیم سلول آندوسپرم دانه) باشد. بنابراین، در این مطالعه، افزایش میزان وزن سنبله در اثر کاربرد هورمون به‌علت افزایش وزن دانه بوده است و هورمون تغییری در میزان کاه سنبله ایجاد نکرده است. در این آزمایش، بیشترین میزان کاه سنبله از شاهد (۰/۳۸ گرم در سنبله) حاصل گردید و محلول‌پاشی با روی، میزان آن را کاهش داد (شکل ۲). در گندم، اجزای غیر برگی دیگری مانند سنبله و ساقه نیز در فتوسنتز مشارکت دارند و از ارگان‌های فتوسنتزی گیاه محسوب می‌شوند. بین وزن تک‌سنبله و متوسط سرعت پر شدن دانه گندم، همبستگی مثبتی وجود دارد (Chen, Zhang, & Deng, 2019). بنابراین، افزایش وزن سنبله در اثر کاربرد روی و هومون می‌تواند صفتی مثبت جهت افزایش عملکرد دانه فرض گردد.

براساس نتایج تجزیه واریانس انجام‌شده (جدول ۳)، تأثیر روی بر تعداد دانه در سنبله معنی‌دار بود. محلول‌پاشی با هورمون تأثیری معنی‌دار بر تعداد دانه در سنبله نداشت (جدول ۳). بیشترین (۲۸ عدد) و کمترین تعداد دانه در سنبله (۲۵/۸ عدد) به‌ترتیب از کاربرد سه کیلوگرم سولفات روی و عدم کاربرد آن (شاهد) حاصل گردید (شکل ۳). تعداد دانه در سنبله نشان‌دهنده قدرت مخزن است که می‌تواند تحت تأثیر منبع (فتوسنتز جاری و مواد ذخیره شده فتوسنتزی) قرار گیرد. عنصر روی در افزایش میزان فتوسنتز مؤثر است (Karmollachaab & Gharineh, 2013; Luo *et al.*, 2019). با افزایش میزان فتوسنتز و انتقال مواد ساخته‌شده فتوسنتزی به گلچه‌های تشکیل‌شده، بقای گلچه و شکل‌گیری دانه افزایش خواهد یافت. به عبارتی دیگر، شکل‌گیری دانه پس از مرحله گرده‌افشانی تحت تأثیر میزان مواد منتقل‌شده فتوسنتزی به سمت دانه قرار می‌گیرد و هرگونه عاملی که موجب کاهش میزان فتوسنتز و یا انتقال آن به گلچه‌های تشکیل‌شده گردد، مانع از تشکیل دانه خواهد شد (Zhang *et al.*, 2020; Zhang *et al.*, 2019). تعداد دانه در سنبله (پتانسل تولید تعداد دانه) بستگی به تعداد گلچه در زمان گل‌دهی دارد (Zhu, Chu, Dai, & He, 2019)، اما تعداد نهایی دانه در مراحل پس از گرده‌افشانی مشخص می‌گردد. عوامل نامساعد محیطی و شرایط تغذیه‌ای پس از مرحله گرده‌افشانی نقش تعیین‌کننده‌ای بر تعداد گلچه‌ای که می‌تواند به مرحله دانه‌بندی برسد، دارند (Zhang *et al.*, 2020). میزان بقای گلچه‌ها به محتوای کربن و انتقال آن‌ها بین ارگان‌های مختلف گیاه بستگی دارد (Zhang *et al.*, 2020; Zhang *et al.*, 2019). بنابراین، ممکن است که افزایش تعداد دانه در اثر محلول‌پاشی روی در این مطالعه به‌علت افزایش میزان فتوسنتز و یا تسهیل انتقال مواد فتوسنتزی به سمت دانه اتفاق افتاده باشد.

اثر محلول‌پاشی با روی، کاربرد خارجی بنزیل آمینو پورین و اثر متقابل این دو تیمار بر وزن دانه در سنبله معنی‌دار بود (جدول ۳).

شکل ۴، تأثیر متقابل تیمار روی و بنزیل آمینو پورین بر وزن هزار دانه را نشان می‌دهد. بیشترین میزان وزن دانه در سنبله (۱/۲۲ گرم) از کاربرد محلول‌پاشی روی با غلظت ۰/۳ درصد آن + کاربرد ۶- بنزیل آمینو پورین (۱۰ میلی‌گرم در لیتر) حاصل شد. سطوح بالاتر روی (۰/۴ درصد)، تأثیر منفی بر وزن دانه در سنبله داشت (شکل ۳). عوامل مختلفی در تعیین وزن نهایی دانه گندم نقش دارند. وزن هزار دانه، صفتی ژنتیکی است و براساس نوع رقم متفاوت است، هرچند که عوامل محیطی مانند خشکی و نیز میزان انتقال مواد ساخته‌شده فتوسنتزی از برگ به سمت دانه‌ها تأثیری مهم در تعیین وزن نهایی دانه دارند. مواد پرورده (آسیمیلات) حاصل از فتوسنتز جاری و ذخیره‌شده قبل از گل‌دهی، نقش مهمی در پر شدن دانه گندم دارند. میزان فتوسنتز می‌تواند تحت تأثیر میزان محتوای روی گیاه قرار گیرد. سطح مناسب روی داخل گیاه منجر به افزایش میزان فتوسنتز می‌گردد (Luo *et al.*, 2019). بنابراین، مواد پرورده بیشتری در اختیار دانه‌ها قرار خواهد گرفت. روی دارای نقش‌های مختلفی در گیاه است. این عنصر، کارآیی مصرف آب (Anwar *et al.*, 2021)، کارآیی فتوسیستم ۲، محتوای کلروفیل و هدایت روزنه‌ای (Pavia *et al.*, 2019) را افزایش می‌دهد. نقش عنصر روی در افزایش میزان کلروفیل برگ در مطالعات انجام‌شده مورد تأیید قرار گرفته است (Adil *et al.*, 2022; Ma *et al.*, 2017)؛ بنابراین، ممکن است روی از طریق افزایش فتوسنتز و انتقال مواد پرورده فتوسنتزی به سمت دانه، زمینه افزایش وزن دانه را فراهم کرده باشد. این یافته‌ها با نتایج گزارش‌های قبلی مبنی بر این‌که محلول‌پاشی با روی، تأثیری مثبت بر افزایش وزن هزار دانه و تعداد دانه در گندم داشته است، مطابقت دارد (Sattar *et al.*, 2022; Zarea, 2023). همچنین تأثیر مثبت کاربرد بنزیل آمینو پورین بر افزایش وزن هزار دانه گندم نیز گزارش شده است (Zarea & Karimi, 2023a). این هورمون موجب افزایش تقسیمات سلول‌های آندوسپرم دانه می‌شود، همچنین انتقال مواد ساخته‌شده فتوسنتزی از منبع (برگ و ساقه) به مخزن (دانه‌ها) را افزایش می‌دهد (Mangena, 2022). گزارش شده است که با افزایش سطح سیتوکنین داخل گیاه، میزان عملکرد دانه، تعداد دانه و اندازه دانه افزایش پیدا کرده است (Cortleven *et al.*, 2019). سهم اجزای غیربرگی (ساقه و سنبله) در افزایش وزن دانه گندم تحت شرایطی که گیاه با کمبود آب قابل‌دسترس مواجه است، برجسته‌تر می‌گردد (Miralles, Richards, & Slafer, 2000; Ferrante, Savin, & Slafer 2012; Ferrante, Savin, Slafer, 2013). بنابراین، به نظر می‌رسد که کاربرد روی و بنزیل آمینو پورین از طریق تداوم فتوسنتز و افزایش انتقال مواد فتوسنتزی به سمت دانه، وزن دانه را افزایش داده‌اند.

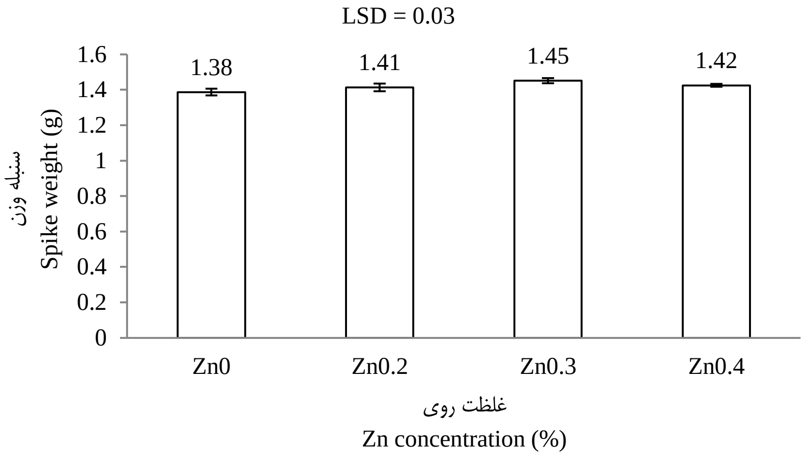
جدول ۳- تجزیه واریانس تأثیر کاربرد محلول‌پاشی برگی با روی و کاربرد خارجی ٦- بنزیل آمینو پورین بر عملکرد و اجزای عملکرد دانه گندم زمستانه رقم سرداری تحت کشت دیم

Table 3- Analysis of variance for the effect of foliar application of Zn and exogenous application of 6-banzyl amino purine on grain yield and yield component of a winter wheat cv. Sardari under rain-fed condition

منابع تغییر S.O.V	درجه آزادی d.f	میانگین مربعات Mean of squres: وزن تک سنبله Spike weight	وزن کاه در سنبله Spike straw weight	تعداد دانه در سنبله Seed no per spike	وزن دانه در سنبله Seed weight per spike	عملکرد دانه Grain yield
بلوک Block	2	0.005*	0.01*	9.49*	0.011**	50195**
روی Zn	1	0.0043**	0.0085**	5.86**	0.040**	198079**
بنزیل‌آمینوپورین 6-BAP	3	0.01**	0.000014ns	0.011ns	0.028**	264084**
روی × بنزیل‌آمینوپورین Zn × 6-BAP	3	0.0003ns	0.004ns	0.103ns	0.0026*	23393**
اشتباه Error	14	0.0006	0.0016	0.65	0.0007	2547
ضریب تغییرات (٪) CV (%)		1.75	12.08	5.33	2.43	2.12

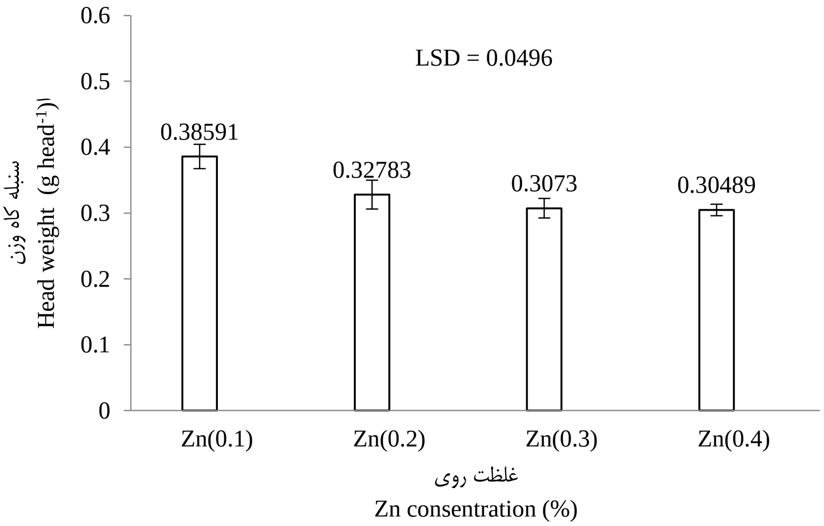
ns، * و **: به‌ترتیب غیرمعنی‌دار و معنی‌دار در سطح احتمال پنج و یک درصد

ns, * and **: indicate non-significant and significant at 0.05 and 0.01 probability level, respectively



شکل ۱- تأثیر محلول‌پاشی برگی با غلظت‌های مختلف روی بر وزن تک سنبله

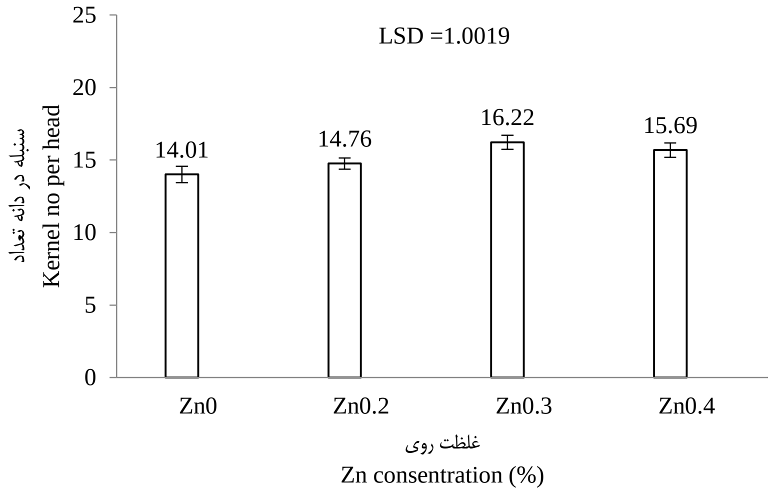
Figure 1- Effect of foliar application with different concentration of Zn on spike weight



شکل ۲- تأثیر محلول‌پاشی برگی با غلظت‌های مختلف روی بر وزن کاه سنبله

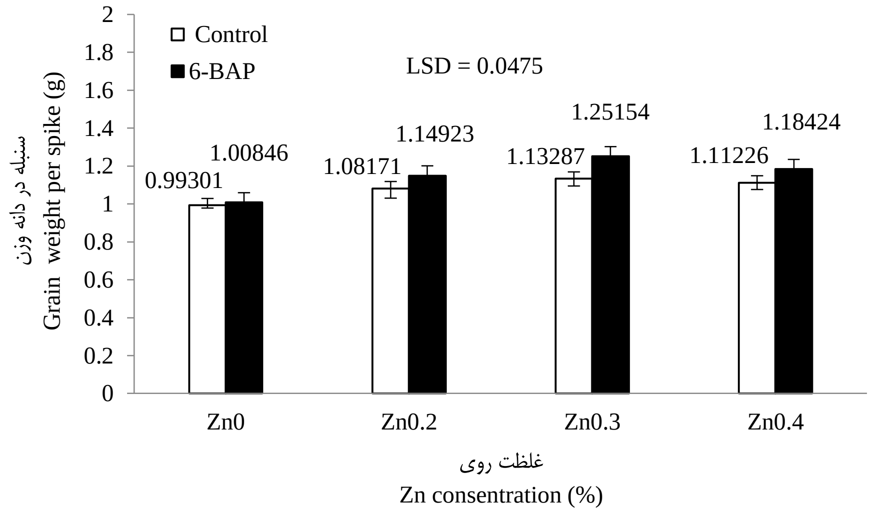
Figure 2- Effect of foliar application with different concentration of Zn on spike chaff

نتایج تجزیه واریانس تأثیر روی و بنزیل آمینو پورین بر عملکرد دانه در جدول ۳ نشان داده شده است. تأثیر تیمار روی، بنزیل آمینو پورین و اثر متقابل آن‌ها بر عملکرد دانه معنی‌دار بود (جدول ۳). میزان عملکرد دانه در شاهد (عدم کاربرد روی) و تحت کاربرد غلظت‌های ۰/۲، ۰/۳ و ۰/۴ درصد محلول روی به‌ترتیب ۲۶۷۳، ۲۹۳۰، ۲۹۹۷ و ۳۰۸۶ کیلوگرم دانه در هکتار بود (شکل ۵). بیشترین عملکرد دانه از کابرد غلظت ۰/۳ درصد محلول روی (معادل سه کیلوگرم سولفات روی در هکتار) و در تلفیق آن با بنزیل آمینو پورین حاصل گردید (شکل ۵). این ترکیب تیماری، میزان عملکرد دانه را در مقایسه با تیمار شاهد (عدم کاربرد روی) به‌میزان ۷/۱ درصد افزایش داد. تأثیر مثبت کاربرد روی از طریق محلول‌پاشی آن بر عملکرد دانه گندم توسط محققان مختلف از کشورهای متفاوت گزارش شده است (Karim *et al.*, 2012; Sattar *et al.*, 2021; Kloface, Antosovsky, & Skarpa, 2023; Zarea & Karimi, 2023b). کاربرد روی به‌صورت مخلوط با خاک، ازطریق پرایم بذر با آن و یا به‌صورت محلول‌پاشی، مبحث پژوهش‌های بسیاری طی چند دهه اخیر بوده است. البته در سال‌های اخیر افزایش محتوای روی دانه از طریق محلول‌پاشی روی بیشتر مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است. آزمایش حاضر تحت شرایط دیم انجام گرفت. متوسط تولید گندم سرداری در مزارع مجاور تا بیش از ۳۰۰۰ کیلوگرم در هکتار هم ثبت گردید که دلیل آن می‌تواند متوسط دماهای کم در طول مراحل پر شدن دانه باشد.



شکل ۳- تأثیر محلول‌پاشی برگی با غلظت‌های مختلف روی بر میزان تعداد دانه در سنبله

Figure 3- Effect of foliar application with different concentration of Zn on seed number per spike

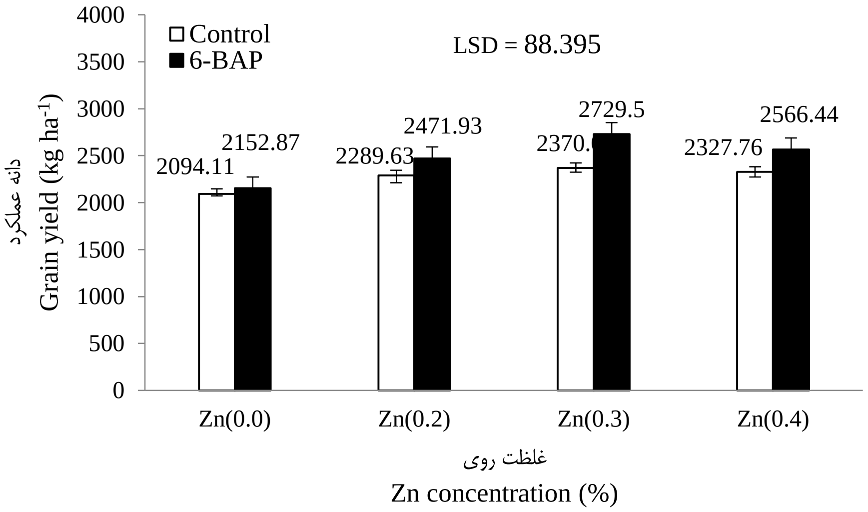


شکل ٤- تأثیر محلول‌پاشی برگی با غلظت‌های مختلف روی و ٦- بنزیل آمینو پورین بر میزان وزن کل دانه در سنبله

Figure 4- Effect of foliar application with different concentration of Zn and 6-Banzylaminopurine (6-BAP) on total seed grain weight per spike

دماهای پایین، طول دوره پر شدن دانه گندم را افزایش می‌دهد. هرچند که کمبود بارش در زمان گرده‌افشانی و به‌خصوص در مراحل پر شدن دانه می‌تواند به‌عنوان یک عامل محدودکننده عملکرد دانه عمل کند (Farooq, Hussain, & Siddique, 2014). در این آزمایش، گیاهان تغذیه شده با روی، تعداد دانه در سنبله و وزن دانه بالاتری در مقایسه با گیاهان شاهد داشتند. افزایش عملکرد گندم تحت شرایط محدودیت آبی گیاه (تنش خشکی) در اثر محلول‌پاشی با روی قبلاً گزارش شده است (Karim *et al.*, 2012; Sattar *et al.*, 2021; Kloface, Kloface, Antosovsky, & Skarpa, 2023). محلول‌پاشی با روی موجب کاهش اثر سوء تنش خشکی از طریق افزایش کارآیی مصرف آب می‌گردد (Anwar *et al.*, 2021). بنابراین، شاید در مطالعه انجام‌گرفته روی محلول‌پاشی شده تأثیری مثبت در افزایش کارآیی مصرف آب گیاه داشته و در نهایت، باعث افزایش میزان عملکرد دانه شده باشد. در این مطالعه، سطح چهارم روی (۰/۴ درصد) تأثیری بر افزایش بیشتر عملکرد دانه نداشت و حتی اثر منفی بر آن داشت. عنصر روی جزو عناصر کم‌مصرف گیاه طبقه‌بندی می‌گردد و نیاز گیاه به آن در مقایسه با عناصر پرمصرف بسیار اندک است. هرچند این عنصر رشد و عملکرد گیاه را افزایش دهد، اما میزان بالای مصرف آن برای گیاه سمیت ایجاد می‌کند. گزارش شده است که محتوای بالای روی، میزان فتوسنتز و عملکرد

گندم را کاهش داده است (Li, Li, Rengel, Liu, & Zhao, 2020). میزان بالای روی منجر به کاهش تقسیمات سلولی آندوسپرم دانه می‌شود. سطوح بالای روی از طویل شدن سلولی جلوگیری می‌کند که نتیجه آن کاهش زیست‌توده گیاهی است (Tsonev & Lidon, 2012). در این تحقیق، تلفیق روی با هورمون بنزیل آمینو پورین، عملکرد دانه را در مقایسه با کاربرد به‌تنهایی روی به‌میزان بیشتری افزایش داد. تأثیر مثبت بنزیل آمینو پورین بر عملکرد دانه گندم قبلاً هم گزارش شده است (Zarea & Karimi, 2023a). ارتباط بین میزان سطح سیتوکنین دانه با افزایش عملکرد و اجزای عملکرد گندم با خاموش کردن ژن کدکننده آنزیم مسئول تجزیه سیتوکنین در چند گیاه مورد تأیید قرار گرفته است. به‌عبارتی، بین میزان سیتوکنین دانه و افزایش عملکرد دانه ارتباط وجود دارد. با خاموش کردن ژن کدکننده آنزیم مسئول تجزیه سیتوکنین، وزن هزار دانه، تعداد دانه در سنبله و عملکرد دانه در گیاه جو (*Hordeum vulgare* L.) افزایش پیدا کرد (Zalewski, Orczyk, Gasparis & Nadolska-Orczyk, 2012). بنابراین، ممکن است تلفیق بنزیل آمینو پورین (نوعی سیتوکنین سنتزی) با محلول روی، از طریق افزایش سطح سیتوکنین داخل دانه، میزان عملکرد دانه را افزایش داده است.



شکل ۵- تأثیر محلول‌پاشی برگی با غلظت‌های مختلف روی و ٦- بنزیل آمینو پورین بر عملکرد دانه گندم

Figure 5- Effect of foliar application with different concentration of Zn and 6-Banzylaminopurine (6-BAP) on wheat grain yield

نتیجه تجزیه واریانس اثر هورمون و روی بر میزان روی دانه در جدول ۴ نشان داده شده است. تأثیر هورمون و روی بر محتوای روی دانه معنی‌دار شد، اما اثر متقابل آن‌ها معنی‌دار نبود (جدول ۴). تأثیر محلول‌پاشی با روی بر افزایش محتوای روی دانه از کاربرد هورمون مؤثرتر بود. محلول‌پاشی با ۶- بنزیل آمینو پورین، میزان روی دانه را از ۲۵/۰۷ (شاهد) به ۲۵/۹۹ میلی‌گرم در کیلوگرم افزایش داد. شکل ۶ میزان محتوای روی دانه تحت تأثیر محلول‌پاشی با غلظت‌های مختلف روی را نشان می‌دهد. بیشترین محتوای روی دانه از کاربرد بالاترین سطح غلظت روی (۰/۴ درصد) حاصل گردید (شکل ۶). افزایش محتوای روی دانه با استفاده از محلول‌پاشی روی توسط سایر پژوهشگران نیز گزارش شده است (Sattar *et al.*, 2022; Zarea & Karimi, 2023a). گزارش شده است که محلول‌پاشی با روی، محتوای روی دانه گندم را از ۴۵ میلی‌گرم در کیلوگرم (در شاهد) به ۵۵ میلی‌گرم در کیلوگرم افزایش داده است (Ozturk *et al.*, 2006). در بررسی دیگری، محلول‌پاشی با روی با استفاده از سولفات روی، محتوای روی دانه را از ۲۸ میلی‌گرم در کیلوگرم به ۵۸ میلی‌گرم در کیلوگرم افزایش داد (Cakmak *et al.*, 2010). بیان شده است که محلول‌پاشی با روی در زمان پر شدن دانه، محتوای روی دانه گندم را از ۱۵/۹ به ۲۰/۵ در سال اول آزمایش و از ۲۶/۴ به ۳۲/۶ در سال دوم آزمایش افزایش داده است (Ivanović *et al.*, 2021). بنزیل آمینو پورین، یک نوع هورمون سنتزی از نوع سیتوکنین است. هورمون سیتوکنین دارای نقش کلیدی در پاسخ گیاه به تنش‌های محیطی دارد (Cortleven *et al.*, 2019). سیتوکنین، مقاومت گیاه به تنش‌های محیطی را افزایش می‌دهد (Cortleven *et al.*, 2019). این هورمون، تجمع عناصری مانند روی را در دانه افزایش داده است (Prasad, 2022). مطالعات میکروسکوپی براساس پروتوهای

فلورسانس اشعه X نشان داده است که روی محلول‌پاشی شده به داخل برگ نفوذ پیدا می‌کند (Xie *et al.*, 2020)، هرچند میزان نفوذپذیری از سطح به داخل برگ بسته به میزان سطح برگ متفاوت خواهد بود (Xie *et al.*, 2020). روی وارد شده از سطح برگ به داخل برگ در ابتدا در سلول‌های اپیدرم بالایی و سپس در سلول‌های اپیدرم پایینی برگ تجمع پیدا می‌کند و سپس با گذشت زمان به آوندها بارگیری می‌گردد (Li *et al.*, 2022). براساس یک مطالعه انجام شده، در نهایت، روی جذب‌شده به دانه منتقل می‌گردد (Kamran *et al.*, 2023). بنابراین، افزایش محتوای روی دانه در اثر محلول‌پاشی با روی در آزمایش حاضر می‌تواند مربوط به جذب و انتقال روی محلول‌پاشی‌شده از سطح برگ به دانه‌ها باشد.

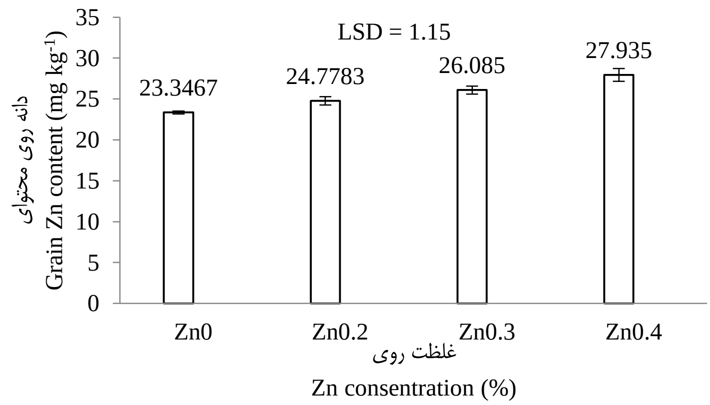
جدول ٤- تجزیه واریانس تأثیر محلول‌پاشی برگی با روی و کاربرد خارجی هورمون ٦- بنزیل آمینو پورین بر محتوای روی دانه گندم تحت شرایط دیم

Table 4- Analysis of variance for the effect of foliar application of Zn and exogenous application of 6-banzyl amino purine on wheat grain Zn content under rain-fed condition

منابع تغییر S.O.V	درجه آزادی df	محتوای روی دانه Grain Zn content
Block بلوک	2	8.35**
Zn روی	3	22.84**
6-BAP بنزیل‌آمینوپورین	1	5.14*
Zn × 6-BAP روی × بنزیل‌آمینوپورین	3	0.2ns
Error اشتباه	14	0.86
CV (%) ضریب تغییرات (٪)		3.66

ns، * و **: به‌ترتیب غیرمعنی‌دار و معنی‌دار در سطح احتمال پنج و یک درصد

ns, * and **: indicate non-significant and significant at 0.05 and 0.01 probability level, respectively



شکل ٦- تأثیر محلول‌پاشی برگی با غلظت‌های مختلف روی بر محتوای روی دانه گندم

Figure 6- Effect of foliar application with different concentration of Zn on grain Zn content of wheat

آزمایش دوم

خلاصه نتایج تجزیه واریانس اثر کاربرد روی (سه کیلوگرم روی در هکتار) از طریق محلول‌پاشی آن به‌تنهایی و در تلقیح با هورمون ۶- بنزیل آمینو پورین و تلقیح برگی با باکتری *آزوسپیریلوم برازیلنس* سویه Sp7 بر تعداد دانه در سنبله، وزن دانه و عملکرد دانه در جدول ۵ ارائه شده است.

تأثیر روی و تلقیح با *آزوسپیریلوم* بر تعداد دانه در سنبله معنی‌دار، اما اثر بنزیل آمینو پورین معنی‌دار نبود (جدول ۵). در هر دو مطالعه انجام شده (آزمایش سال اول و دوم)، تأثیر روی بر تعداد دانه معنی‌دار بود. روی محلول‌پاشی‌شده موجب افزایش معنی‌دار تعداد دانه در سنبله

(۷/۹۷ درصد) در مقایسه با شاهد (عدم کاربرد روی) گردید. باکتری در مقایسه با روی، تأثیر کمتری بر افزایش تعداد دانه در سنبله داشت. تعداد دانه در سنبله در اثر محلول‌پاشی با باکتری به‌میزان ۵/۳۷ درصد در مقایسه با عدم کاربرد آن (شاهد) افزایش یافت. هیچ‌کدام از اثرات متقابل تیمارها بر تعداد دانه معنی‌دار نگردید (جدول ۵). در سال‌های اخیر، تلقیح برگی، جایگاه قابل‌قبولی را در بین روش‌های استفاده از این باکتری در زراعت گیاهان زراعی پیدا کرده است (Puente *et al.*, 2020)، هرچند در این روش (تلقیح برگی) از جمعیت باکتری در سطح برگ به‌سرعت کاسته می‌گردد. البته مطالعات انجام‌گرفته نشان داده است که این باکتری از سطح برگ به داخل برگ نفوذ کرده و ابتدا در سلول‌های اپیدرم بالایی و سپس در سلول‌های اپیدرم پایینی تجمع و در نهایت، وارد آوند چوبی می‌شوند (Puente *et al.*, 2020). بنابراین، این امکان وجود دارد که باکتری واردشده به داخل برگ منجر به تأثیرات مثبت در گیاه گردد (Cardozo *et al.*, 2021; Puente *et al.*, 2020). در مطالعه حاضر، تلقیح برگی با باکتری باعث افزایش تعداد دانه در سنبله گردید. تأثیر مثبت این باکتری از طریق کاربرد محلول‌پاشی آن مورد تأیید قرار گرفته است (Cardozo *et al.*, 2021; Puente *et al.*, 2020) هرچند سازوکار اثر مورد مطالعه و بررسی قرار نگرفته است. در مطالعه‌ای انجام‌گرفته روی ذرت، تلقیح برگی این باکتری، میزان کلروفیل برگ را افزایش داد (Cardozo *et al.*, 2021). بنابراین، امکان افزایش میزان فتوسنتز در اثر کاربرد محلول‌پاشی این باکتری وجود دارد. باکتری استفاده‌شده در این آزمایش، قادر به تولید میزان قابل‌توجهی هورمون اکسین است. بنابراین، این امکان وجود دارد که باکتری از طریق تولید هورمون اکسین باعث ایجاد تغییرات مثبت در گیاه شده باشد (Puente *et al.*, 2020).

تأثیر کاربرد روی و باکتری به‌تنهایی و در تلفیق با هم بر وزن هزار دانه معنی‌دار بود (جدول ۵). محلول‌پاشی با روی، وزن هزار دانه را به‌میزان ۴/۷۲ درصد در مقایسه با شاهد افزایش داد (شکل ۷). تأثیر باکتری بر افزایش وزن هزار دانه در مقایسه با کاربرد روی کمتر (۱/۶۶ درصد) بود (شکل ۷). اثر متقابل بین این دو تیمار (روی و باکتری) بر وزن هزار دانه معنی‌دار بود (جدول ۵). بالاترین میزان وزن دانه از تلفیق روی و باکتری حاصل شد (شکل ۷). برخلاف سال اول آزمایش، تأثیر هورمون بر وزن دانه معنی‌دار نبود. علت عدم تأثیرگذاری هورمون در سال دوم آزمایش را می‌توان به غلظت استفاده شده آن ارتباط داد (Zarea & Karimi, 2023a). رشد و عملکرد گندم در سال دوم به‌دلیل میزان بیشتر بارش بیش از سال اول آزمایش بود. بنابراین، غلظت مورد استفاده به اندازه‌ای نبوده است که سطح هورمون داخل گیاه را به اندازه کافی افزایش دهد. دلیل دوم می‌تواند مربوط به شرایط مطلوب‌تر (میزان بارش‌های بیشتر) دوره پر شدن دانه باشد. در سال دوم، میزان بارش در اواخر دوره رشد گیاه بیش از سال اول آزمایش بود. بنابراین، اثرگذاری هورمون بر افزایش وزن و تعداد دانه کمتر بوده است.

اثر محلول‌پاشی با روی و تلقیح برگی با باکتری و اثر متقابل این دو تیمار بر عملکرد دانه معنی‌دار بود (جدول ۵). اثر بنزیل آمینو پورین بر عملکرد دانه معنی‌دار نبود (جدول ۵). کاربرد روی در مقایسه با شاهد، میزان عملکرد دانه را ۱۲/۸ درصد افزایش داد. افزایش عملکرد دانه در اثر تلقیح با باکتری، ۶/۶ درصد بود. بالاترین عملکرد دانه از کاربرد تلفیقی باکتری و روی حاصل شد (شکل ۸). تأثیر مثبت محلول‌پاشی با باکتری *آزوسپیریلوم برازیلنس* در دو گیاه ذرت (*Zea mays* L.) (Cardozo *et al.*, 2021) و سویا (*Glycine max* L.) (Puente *et al.*, 2020) نیز گزارش شده است.

نتیجه‌گیری

افزایش کیفی دانه گندم ضمن حفظ عملکرد کمّی آن در بوم‌نظام‌های زراعی که با تنش‌های مختلف محیطی مواجه هستند، از اهمیت بالایی برخوردار است. بخش قابل‌توجهی از گندم تولیدشده داخل کشور مربوط به اراضی کشاورزی دیم است. تغییرات اقلیمی و گرمایش جهانی، طول دوره‌های خشکی و تکرار رخدادهای آن را افزایش داده است. در اثر کم‌بارشی‌های ناشی از تغییر اقلیم، ثبات عملکرد گندم با خطر مواجه شده است. براساس گزارش‌های منتشرشده، افزایش محتوای روی دانه از طریق محلول‌پاشی روی در گندم امکان‌پذیر است، هرچند میزان و زمان کاربرد آن منجر به پاسخ‌های متفاوت در عملکرد و محتوای روی دانه می‌گردد. در دهه‌های اخیر، تلاش‌های بسیاری از سوی پژوهشگران علوم زراعی جهت افزایش محتوای روی دانه غلات به‌خصوص گندم انجام گرفته است. از طرفی، شرایط اقلیمی، نوع زراعت (دیم و یا آبی) و نوع رقم بر انتخاب میزان روی جهت افزایش محتوای روی دانه تأثیرگذار هستند. در تحقیق حاضر، کاربرد ۰/۳ درصد روی (سه کیلوگرم سولفات روی در هکتار) به‌صورت محلول‌پاشی در اواخر مرحله گرده‌افشانی، میزان عملکرد و محتوای روی دانه گندم را افزایش داد. روی از طریق افزایش تعداد و وزن دانه، عملکرد دانه را افزایش داد. تلفیق روی با باکتری *آزوسپیریلوم برازیلنس* (*Azospirillum brasilense* Sp7) موجب دستیابی به عملکرد بالاتری گردید.

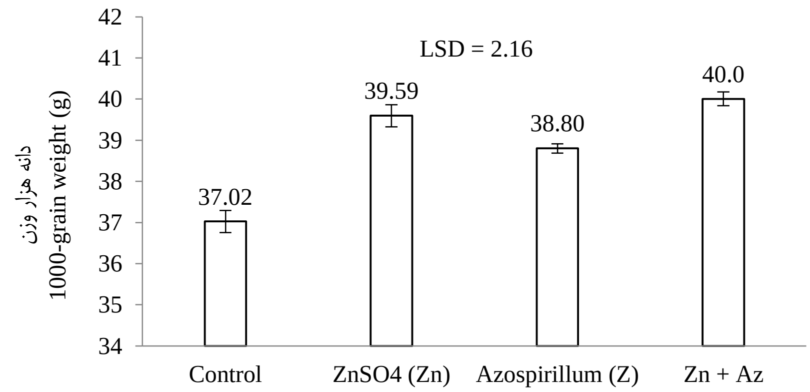
جدول ٥- تجزیه واریانس تأثیر محلول‌پاشی بعد از گرده‌افشانی با روی، کاربرد خارجی هورمون ٦- بنزیل آمینو پورین و تلقیح باکتری *آزوسپیریلوم* بر تعداد دانه در سنبله، وزن هزار دانه و عملکرد دانه گندم تحت کشت دیم

Table 5- Analysis of variance for the effect of foliar application of Zn, exogenous application of 6-banzyl amino purine and foliar inoculation with *Azospirillum brasilense* after anthesis on the number of grain per spike, grain weight and yield in wheat under rain-fed condition

منابع تغییر S.O.V	درجه آزادی df	تعداد دانه در سنبله Seed no. per spike	وزن هزار دانه 1000-Grain weight	عملکرد دانه Grain yield
بلوک Block	2	0.36ns	0.11ns	20559ns
روی Zn	1	14.24**	20.1**	940677**
بنزیل‌آمینوپورین 6-BAP	1	0.03ns	0.37ns	18.19ns
آزوسپیریلوم *Azospirillum* (*Az*)	1	6.61**	2.48**	267383**
روی × بنزیل‌آمینوپورین Zn × BAP	1	1.47ns	0.45ns	26058ns
روی ×*آزوسپیریلوم* Zn × *Az*	1	1.73ns	7.72**	170133**
آزوسپیریلوم × بنزیل‌آمینوپورین *Az* × BAP	1	0.006ns	0.88ns	12272ns
روی × بنزیل‌آمینوپورین ×*آزوسپیریلوم* Zn × BAP × *Az*	1	0.84ns	0.47ns	37453ns
اشتباه Error	14	0.54	0.27	14382
ضریب تغییرات (٪) CV (%)		3.66	3.51	3.65

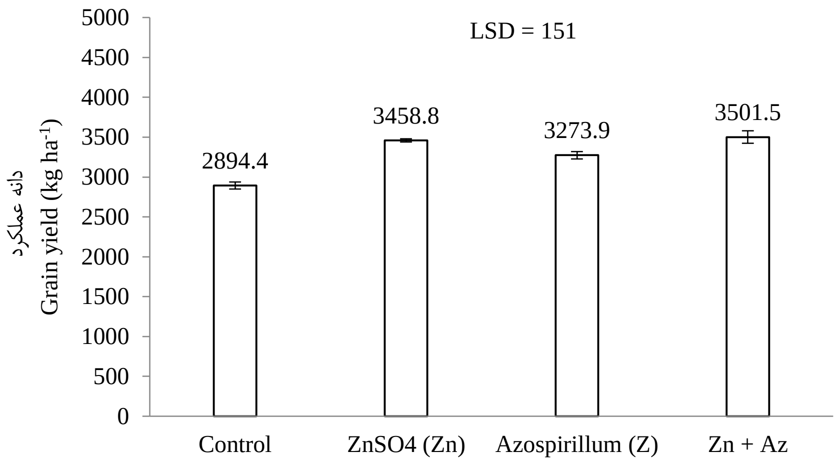
ns، * و **: به‌ترتیب غیرمعنی‌دار و معنی‌دار در سطح احتمال پنج و یک درصد

ns, * and **: indicate non-significant and significant at 0.05 and 0.01 probability level, respectively



شکل ۷- تأثیر محلول‌پاشی برگی با روی و *آزوسپیریلوم برازیلنس* به‌صورت جداگانه و در کاربرد تلفیقی آن‌ها بر وزن هزار دانه گندم

Figure 7- The effect of foliar spraying with zinc and *Azospirillum brasilense*, both singly and in combination, on 1000- grain weight of wheat



شکل ۸- تأثیر محلول‌پاشی برگی با روی و *آزوسپیریلوم برازیلنس* به‌صورت جداگانه و در کاربرد تلفیقی آن‌ها بر عملکرد دانه گندم

Figure 8- The effect of foliar spraying with zinc and *Azospirillum brasilense*, both singly and in combination, on wheat grain yield

با توجه به نتایج دو مطالعه انجام گرفته، محلول‌پاشی با روی به‌تنهایی و یا در تلفیق با باکتری *آزوسپیریلوم* در مرحله گل‌دهی نه‌تنها عملکرد دانه را توانست افزایش دهد، بلکه محتوای روی دانه را نیز افزایش داد. این نتایج می‌تواند جهت بالابردن عملکرد و افزایش محتوای روی دانه گندم مورد توجه قرار گیرد. با تأکید بر این‌که نوع زراعت، نوع رقم و شرایط اقلیمی در دوره پر شدن دانه می‌توانند در انتخاب میزان مصرف روی تأثیرگذار باشند.

سپاسگزاری

هزینه‌های انجام این پژوهش در قالب طرح شماره IRILU-Ag-000214-23-04 معاونت محترم پژوهش و فناوری دانشگاه ایلام تأمین شده است، که بدین‌وسیله قدردانی می‌گردد. علاوه بر این نویسنده مقاله از نظرات ارائه‌شده توسط داوران محترم تشکر و قدردانی می‌نماید.

References

1. Adil, M., Bashir, S., Bashir, S., Aslam, Z., Ahmad, N., Younas, T., Asghar, R. M. A., Alkahtani, J., Dwiningsih, Y., & Elshikh, M. S. (2022). Zinc oxide nanoparticles improved chlorophyll contents, physical parameters, and wheat yield under salt stress. *Frontiers in Plant Science*, *13*, 932861. https://doi.org/10.3389/fpls.2022.932861
2. Andrejic, G., Gajic, G., Prica, M., Dželetović, Ž., & Rakić, T. (2018). Zinc accumulation, photosynthetic gas exchange, and chlorophyll a fluorescence in Zn-stressed miscanthus × Giganteus plants. *Photosynthetica*, *56*(4), 1249-1258. https://doi.org/10.1007/s11099-018-0827-3
3. Anwar, S., Khalilzadeh, R., Khan, S., Zaib-un-Nisa, Bashir, R., Pirzad, A., & Malik, A. (2021). Mitigation of drought stress and yield improvement in wheat by zinc foliar spray relates to enhanced water use efficiency and zinc contents. *International Journal of Plant Production*, *15*(3), 377-389. https://doi.org/10.1007/s42106-021-00136-6
4. Broadley, M. R., White, P. J., Hammond, J. P., Zelko, I., & Lux, A. (2007). Zinc in plants. *New Phytologist*, *173*(4), 677-702. https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2007.01996.x
5. Cakmak, I. (2008). Enrichment of cereal grains with Zinc: Agronomic or genetic biofortification? *Plant and Soil*, *302*(1), 1-17.
6. Cakmak, I., & Kutman, U. B. (2018). Agronomic biofortification of cereals with zinc: A review. *European Journal of Soil Science*, *69*(7), 172-180. https://doi.org/10.1111/ejss.12437
7. Cakmak, I., Kalayci, M., Kaya, Y., Torun, A., Aydin, N., Wang, Y., Arısoy, Z., Erdem, H., Yazici, A. M., Gokmen, O. O., Ozturk, L., & Horst, W. J. (2010). Biofortification and localization of zinc in wheat grain. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, *58*(16), 9092-9102. https://doi.org/10.1021/jf101197h
8. Cardozo, P. W., Di Palma, A., Martín, S., Cerliani, C., Espósito, G., Reinoso, H., & Travaglia, C. (2021). Improvement of maize yield by foliar application of *Azospirillum brasilense* Az39. *Journal of Plant Growth Regulation 41*(1), 1032-1040. https://doi.org/10.1007/s00344-021-10356-9
9. Chen, W., Zhang, J., & Deng, X. (2019). The spike weight contribution of the photosynthetic area above the upper internode in a winter wheat under different nitrogen and mulching regimes. *The Crop Journal*, *7*(1), 89-100. https://doi.org/10.1016/j.cj.2018.10.004

10. Coleman, J. E. (1998). Zinc enzymes. *Current Opinion in Chemical Biology*, *2*(2), 222-234. https://doi.org/10.1016/s1367-5931(98)80064-1
11. Cortleven, A., Leuendorf, J. E., Frank, M., Pezzetta, D., Bolt, S., & Schmülling, T. (2019). Cytokinin action in response to abiotic and biotic stresses in plants. *Plant Cell and Environment*, *42*(3), 998-1018. https://doi.org/10.1111/pce.13494
12. Desta, M. K., Broadley, M. R., McGrath, S. P., Hernandez-Allica, J., Hassall, K. L., Gameda, S., Amedem, T., & Haefele, S. M. (2023). Linking oil adsorption-desorption characteristics with grain zinc concentrations and uptake by teff, wheat and maize in different landscape positions in Ethiopia. *Frontire in Agronomy*, *5*, 1285880. https://doi.org/10.3389/fagro.2023.1285880
13. Farooq, M., Hussain, M., & Siddique, K. H. (2014). Drought stress in wheat during flowering and grain-filling periods. *Critical Reviews in Plant Sciences*, *33*(4), 331-349. https://doi.org/10.1080/07352689.2014.875291
14. Ferrante, A., Savin, R., & Slafer, G. A. (2012). Differences in yield physiology between modern, well adapted durum wheat cultivars grown under contrasting conditions. *Field Crops Research*, *136*, 52-64. https://doi.org/10.1016/j.fcr.2012.07.015
15. Ferrante, A., Savin, R., & Slafer, G. A. (2013). Is floret primordia death triggered by floret development in durum wheat? *Journal of Experimental Botany*, *64*(10), 64, 2859-69. https://doi.org/10.1093/jxb/ert129
16. Ivanović, D., Dodig, D., Đurić, N., Kandić, V., Tamindžić, G., Nikolić, N., & Savić, J. (2021). Zinc biofortification of bread winter wheat grain by single zinc foliar application. *Cereal Research Communications*, *49*(4), 673-679. https://doi.org/10.1007/s42976-021-00144-2
17. Jones, J. N. (2001). *Laboratory Guide for Conducting Soil Tests and Plant Analysis*. CRC Press.
18. Kamran, A., Ghazanfar, M., Khan, J. S., Pervaiz, S., Siddiqui, M. H., & Alamri, S. A. (2023). Zinc absorption through leaves and subsequent translocation to the grains of bread wheat after foliar spray. *Agriculture*, *13*(9),1775. https://doi.org/10.3390/agriculture13091775
19. Karim, M. R., Zhang, Y., Zhao, R., Chen, X., Zhang, F., & Zou, C. (2012). Alleviation of drought stress in winter wheat by late foliar application of zinc, boron, and manganese. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, *175*(1), 142-151. https://doi.org/10.1002/jpln.201100141
20. Karmollachaab, A., & Gharineh, M. H. (2013). Effect of zinc element on growth, yield components and some physiological characteristics of maize under NaCl salinity stress. *Iranian Journal of Field Crops Research*, *11*(3), 446-453. (in Persian with English abstract). https://doi.org/10.22067/gsc.v11i3.29744
21. Kashif, M., Sang, Y., Mo, S., Rehman, S. U., Khan, S., Khan, M. R., He, S., & Jiang, C. (2023). Deciphering the biodesulfurization pathway employing marine mangrove bacillus aryabhattai strain NM1-A2 according to whole genome sequencing and transcriptome analyses. *Genomics* *115*(3), 110635. https://doi.org/10.1016/j.ygeno.2023.110635
22. Klofac, D., Antosovsky, J., & Skarpa, P. (2023). Effect of zinc foliar fertilization alone and combined with trehalose on maize (*Zea mays* L.) growth under the drought. *Plants*, *12*(13), 2539. https://doi.org/10.3390/plants12132539
23. Li, C., Wang, L., Wu, J., Blamey, F. P. C., Wang, N., Chen, Y., Ye, Y., Wang, L., Paterson, D. J., Read, T. L., Wang, P., Lombi, E., Wang, Y., & Kopittke, P. M. (2022). Translocation of foliar absorbed Zn in sunflower (*Helianthus annuus*) leaves. *Front Plant Science*, *13*, 757048. https://doi.org/10.3389/fpls.2022.757048
24. Li, G., Li, C., Rengel, Z., Liu, H., & Zhao, P. (2020). Excess Zn-induced changes in physiological parameters and expression levels of *TaZips* in two wheat genotypes. *Environmental and Experimental Botany*, *177*(2), 104133. https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2020.104133
25. Li, L. L., Wei, M. M., Li, X., & Wang, X. Y. (2019a). Effects of exogenous 6-BA on the yield of wheat after rice in the Jianghan plain under different shading treatments. *Chinese The Journal of Applied Ecology*, *30*(11), 3753-3761. https://doi.org/10.13287/j.1001-9332.201911.024
26. Li, S., Song, M., Duan, J., Yang, J., Zhu, Y., & Zhou, S. (2019b). Regulation of spraying 6-BA in the late jointing stage on the fertile floret development and grain setting in winter wheat. *Agronomy*, *9*, 546. https://doi.org/10.3390/agronomy9090546
27. Lian, X., Liu, S., Sikandar, A., Kang, Z. L., Feng, Y., Jiang, L., & Wang, Y. (2023). The influence of 6-benzylaminopurine (BAP) on yield responses and photosynthetic physiological indices of soybean. *Kuwait Journal of Science*, *50*(2), 345-352. https://doi.org/10.1016/j.kjs.2022.12.002
28. Luo, H., Du, B., He, L., He, J., Hu, L., Pan, S., & Tang, X. (2019). Exogenous application of zinc (Zn) at the heading stage regulates 2-acetyl-1-pyrroline (2-AP) biosynthesis in different fragrant rice genotypes. *Scientific Report*, *9*, 19513. https://doi.org/10.1038/s41598-019-56159-7
29. Ma, D., Sun, D., Wang, C., Ding, H., Qin, H., Hou, J., Huang, X., Xie, Y., & Guo, T. (2017). Physiological responses and yield of wheat plants in zinc-mediated alleviation of drought stress. *Frontiers in Plant Science, 8,* 860. https://doi.org/10.3389/fpls.2017.00860
30. Mangena, P. (2022). Evolving role of synthetic cytokinin 6-benzyl adenine for drought stress tolerance in soybean (*Glycine max* L. Merr.). *Frontiers in Sustainable Food Systems*, *6*, 992581.

https://doi.org/10.3389/fsufs.2022.992581
31. Miralles, D. J., Richards, R., & Slafer, G. A. (2000). Duration of the Stem elongation period influences the number of fertile florets in wheat and barley. *Australian Journal of Plant Physiology*, *27(10)*, 931-940. https://doi.org/10.1071/PP00021
32. Moore, K. G., & Leach, R. W. (1968). The Effect of 6-Benzylaminopurine (benzyladenine) on senescence and chocolate spot (*Botrytis fabae*) of winter beans (*Viciafaba*). *Annals of Applied Biology*, 61, 65-76. https://doi.org/10.1111/j.1744-7348.1968.tb04510.x
33. Ning, P., Fei, P., Wu, T., Li, Y., Qu, C., Li, Y., Shi, J., & Tian, X. (2021). Combined foliar application of zinc sulphate and selenite affects the magnitude of selenium biofortification in wheat (*Triticum aestivum* L.). *Food and Energy Security*. *11*(1), e342. https://doi.org/10.1002/fes3.342
34. Omer, A. M., Osman, M. S., & Badawy, A. A. (2022). Inoculation with *Azospirillum brasilense* and/or *Pseudomonas geniculata* reinforces flax (*Linum usitatissimum*) growth by improving physiological activities under saline soil conditions. *Botanical Studies*, *63*(1), 15. https://doi.org/10.1186/s40529-022-00345-w
35. Ozturk, L., Yazici, M. A., Yucel, C., Torun, A., Cekic, C., Bagci, A., Özkan, H., Braun, H., Sayers, Z., & Cakmak, I. (2006). Concentration and lcalization of zinc during seed development and germination in wheat. *Physiologia Plantarum*, *128*(1), 144-152. https://doi.org/10.1111/j.1399-3054.2006.00737.x
36. Pavia, I., Roque, J., Rocha, L., Ferreira, H., Castro, C., Carvalho, A., Silva, E., Brito, C., Gonçalves, A., Lima-Brito, J., & Correia, C. (2019). Zinc priming and foliar application enhances photoprotection mechanisms in drought-stressed wheat plants during anthesis. *Plant Physiology and Biochemistry*, *140*, 27-42. https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2019.04.028
37. Prasad, R. B. (2022). Cytokinin and its key role to enrich the plant nutrients and growth under adverse conditions-An update. *Frontiers in Genetics*, *13*, 1-4. https://doi.org/10.3389/fgene.2022.883924
38. Puente, M. L., Maroniche, G. A., Panepucci, M., Sabio, Y., García, J., Garcia, J. E., Criado, M. V., Molina, R. M., & Cassan, F. D. (2020). Localization and survival of *Azospirillum brasilense* Az39 in soybean leaves. *Letters in Applied Microbiology*, *72*(5), 626-633. https://doi.org/10.1111/lam.13444
39. Ren, B., Zhang, J., Dong, S., Liu, P., & Zhao, B. (2017). Regulations of 6-Benzyladenine (6-BA) on leaf ultrastructure and photosynthetic characteristics of waterlogged summer maize. *Journal of Plant Growth Regulation*, *36*(1-2), 743-754. https://doi.org/10.1007/s00344-017-9677-7
40. Saha, B. N., Saha, S., Saha, S., Deb Roy, P., Bhowmik, A., & Hazra, G. C. (2020). Zinc (Zn) application methods influences Zn and iron (Fe) bioavailability in brown rice. *Cereal Research Communications*, *48*(93), 293-299. https://doi.org/10.1007/s42976-020-00038-9
41. Sattar, A., Wang, X., Abbas, T., Sher, A., Ijaz, M., Ul-Allah, S., Irfan, M., Butt, M., Wahid, M. A., Cheema, M., Fiaz, S., Qayyum, A., Ansari, M. J., Alharbi, S. A., Wainwright, M., Ahmad, F., Xie, K., & Zuan, A. T. (2021). Combined application of zinc and silicon alleviates terminal drought stress in wheat by triggering morpho-physiological and antioxidants defense mechanisms. *PLoS ONE*, *16*, e0256984. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0256984
42. Sattar, A., Wang, X., Ul-Allah, S., Sher, A., Ijaz, M., Irfan, M., Abbas, T., Hussain, S., Nawaz, F., Al-Hashimi, A., Al Munqedhi, B. M., & Skalicky, M. (2022). Foliar application of zinc improves morpho-physiological and antioxidant defense mechanisms, and agronomic grain biofortification of wheat (*Triticum aestivum* L.) under water stress. *Saudi Journal of Biological Sciences*, *29*(3), 1699-1706. https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2021.10.061
43. Tsonev, T., & Lidon, F. J. C. (2012). Zinc in plants-An overview. *Emirates Journal of Food and Agriculture*, *24*(4), 322-333.
44. Umair Hassan, M., Aamer, M., Umer Chattha, M., Tang, H., Shahzad, B., Barbanti, L., Nawaz, M., Rasheed, A., Afzal, A., Liu, Y., & Huang, G. (2020). The critical role of zinc in plants facing the drought stress. *Agriculture*, *10*(9), 396. https://doi.org/10.3390/agriculture10090396
45. Vylicilova, H., Bryksova, M., Matuskova, V., Dolezal, K., Plihalova, L., & Strnad, M. (2020).Naturally occurring and artificial N9-cytokinin conjugates: From synthesis to biological activity and back. *Biomolecules*, *10*(6), 832. https://doi.org/10.3390/biom10060832
46. Wu, X., Gong, D., Zhao, K., Chen, D., Dong, Y., Gao, Y., Wang, Q., & Hao, G. (2024). Research and development trends in plant growth regulators. *Advanced Agrochem. Advanced Agrochem*, *3*(1), 99-106. https://doi.org/10.1016/j.aac.2023.11.005
47. Xia, H., Xue, Y., Liu, D., Kong, W., Xue, Y., Tang, Y., Li, J., Li, D., & Mei, P. (2018). Rational application of fertilizer nitrogen to soil in combination with foliar Zn spraying improved Zn nutritional quality of wheat grains. *Frontiers in Plant Science*, *9*, 677. https://doi.org/10.3389/fpls.2018.00677
48. Xie, R., Zhao, J., Lu, L., Brown, P. H., Guo, J., & Tian, S. (2020). Penetration of foliar-applied Zn and its impact on apple plant nutrition status: *in vivo* evaluation by synchrotron-based X-ray fluorescence microscopy. *Horticulture Research*, *7*(1), 147. https://doi.org/10.1038/s41438-020-00369-y
49. Yang, D. Q., Luo, Y. L., Dong, W. H., Yin, Y. P., Li, Y., & Wang, Z. L. (2018). Response of photosystem II performance and antioxidant enzyme activities in stay-green wheat to cytokinin. *Photosynthetica* *56*(2), 567-577.

https://doi.org/10.1007/s11099-017-0708-1
50. Yuan, J., Li, Y., Shan, Y., Tong, H., & Zhao, J. (2023). Effect of magnesium ions on the mechanical properties of soil reinforced by microbially induced carbonate precipitation. *Journal of Materials in Civil Engineering*, *35*(11). https://doi.org/10.1061/JMCEE7.MTENG-15080
51. Zalewski, W., Orczyk, W., Gasparis, S., & Nadolska-Orczyk, A. (2012). *HvCKX2* gene silencing by biolistic or agrobacterium-mediated transformation in barley leads to different phenotypes. *BMC Plant Biology*, *12*(1), 206. https://doi.org/10.1186/1471-2229-12-206
52. Zarae, M. J. (2023). Effect of foliar application of zinc and exogenous application of proline on yield and grain Zn and P content in a wheat durum cultivar Saji under drought stress condition. *Cereal Biotechnology and Biochemistry*, *2*(3), 269-287. (in Persian with English abstract). https://doi.org/10.22126/cbb.2024.9987.1061
53. Zarea, M. J. (2017). *Azospirillum* and wheat production. in V. Kumar, M. Kumar, S. Sharma and R. Prasad (eds.) Probiotics in Agroecosystem. Springer, Singapore. Pp. 329-348. https://doi.org/10.1007/978-981-10-4059-7_17
54. Zarea, M. J., & Karimi, N. (2023a). Grain yield and quality of wheat are improved through post-flowering foliar application of zinc and 6-benzylaminopurine under water deficit condition. *Frontiers in Plant Science*, *13*, 1068649. https://doi.org/10.3389/fpls.2022.1068649
55. Zarea, M. J., & Karimi, N. (2023b). Zinc-Regulated *P5CS* and sucrose transporters *SUT1B* expression to enhance drought stress tolerance in wheat. *Journal of Plant Growth Regulation*, *42*(9), 5831-5841. https://doi.org/10.1007/s00344-023-10968-3
56. Zhang, G., Zhao, Z., Yin, X., & Zhu, Y. (2021). Impacts of biochars on bacterial community shifts and biodegradation of antibiotics in an agricultural soil during short-term incubation. *The Science of The Total Environment 771*(6), 144751. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.144751
57. Zhang, W., Wang, B., Zhang, A., Zhou, Q., Li, Y., Li, L., Ma, S., Fan, Y., & Huang, Z. (2022). Exogenous 6-benzylaminopurine enhances waterlogging and shading tolerance after anthesis by improving grain starch accumulation and grain filling. *Frontiers in Plant Science*, *13*, 1003920. https://doi.org/10.3389/fpls.2022.1003920
58. Zhang, W., Wang, J., Huang, Z., Mi, L., Xu, K., Wu, J., Fan, Y., Ma, S., & Jiang, D. (2019). Effects of low temperature at booting stage on sucrose metabolism and endogenous hormone contents in winter wheat spikelet. *Frontiers in Plant Science*, *10*, 498. https://doi.org/10.3389/fpls.2019.00498
59. Zhang, Z., Huang, J., Gao, Y., Liu, Y., Li, J., Zhou, X., Yao, C., Wang, Z., Sun, Z., & Zhang, Y. (2020). Suppressed ABA signal transduction in the spike promotes sucrose use in the stem and reduces grain number in wheat under water stress. *Journal of Experimental Botany*, *71*(22), 7241-7256. https://doi.org/10.1093/jxb/eraa380
60. Zhu, Y., Chu, J., Dai, X., & He, M. (2019). Delayed sowing increases grain number by enhancing spike competition capacity for assimilates in winter wheat. *European Journal of Agronomy*, *104*, 49-62. https://doi.org/10.1016/j.eja.2019.01.006
61. Zou, C., Zhang, Y., Rashid, A., Ram, H., Savaşlı, E., Arısoy, R. Z., Ortiz-Monasterio, I., Simunji, S., Wang, Z., Sohu, V. S., Hassan, M., Kaya, Y., Onder, O., Lungu, O. I., Mujahid, M. Y., Joshi, A. K., Joshi, A. K., Zelenskiy, Y., Zhang, F., & Cakmak, I. (2012). Biofortification of wheat with zinc through zinc fertilization in seven countries. *Plant and Soil*, *361*(1-2), 119-130. https://doi.org/10.1007/s11104-012-1369-2